

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМУ И ДИНАМИКУ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

*А. Г. Рекс, С. Г. Погирницкая*

*Белорусская государственная политехническая академия  
Минск, Беларусь*

Интерес к исследованию поведения капель магнитной жидкости в магнитном поле обусловлен большим количеством новых качественных эффектов [1–3]. Ранее было установлено [4], что плоская капля магнитной жидкости в продольном однородном магнитном поле деформируется вдоль его направления. Настоящая работа является продолжением данного исследования и посвящена теоретическому обоснованию полученных в [4] результатов и изучению динамики деформирования плоских капель магнитной жидкости в продольном однородном магнитном поле при скачкообразном его включении.

### 1. Теоретическое исследование

Рассматривается капля магнитной жидкости, помещенная в горизонтальной щели высотой  $h$  между двумя плоскими поверхностями (рис. 1). Магнитная жидкость характеризуется плотностью  $\gamma$  и намагниченностью  $M$ . Капля магнитной жидкости окружена немагнитной средой той же плотности. Расстояние  $h$  между плоскими поверхностями много меньше диаметра капли, и поэтому предполагается, что в отсутствие магнитного поля капля имеет форму плоского диска диаметра  $D$ . Боковая поверхность диска имеет постоянную по периметру кривизну  $2/h$ .

Во внешнем однородном магнитном поле  $H$ , параллельном плоским поверхностям, капля увеличивает свою длину  $2a$  вдоль направления поля (рис. 1). Давления в точках А и В с учетом поверхностного натяжения и магнитного скачка давления определяются из выражений

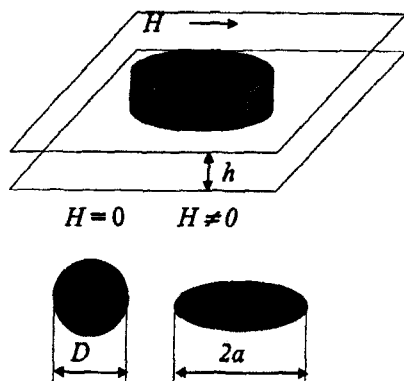


Рис. 1. Геометрия задачи

$$p_A = p_0 + \sigma \left( \frac{1}{R_1^A} + \frac{1}{R_2^A} \right) - \frac{1}{2} \mu_0 M_n^2 \quad (1)$$

$$p_B = p_0 + \sigma \left( \frac{1}{R_1^B} + \frac{1}{R_2^B} \right) \quad (2)$$

где  $p_0$  — давление в среде, окружающей каплю,  $M_n$  — нормальная к поверхности капли компонента намагниченности (в точке А:  $M_n = M$ ),  $R_1^A, R_2^A, R_1^B, R_2^B$  — главные радиусы кривизны в точках А и В соответственно,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения.

Используя предположение, что горизонтальное сечение капли в магнитном поле имеет форму эллипса, можно выразить главные радиусы кривизны через величины полуосей  $a$  и  $b$ :  $R_1^A = b^2/a$ ,  $R_1^B = a^2/b$ ,  $R_2^A = R_2^B = h/2$ . В равновесном случае  $p_A = p_B$ . С учетом закона сохранения массы можно получить систему уравнений для определения относительной длины капли  $\alpha = 2a/D$  и ширины  $\beta = 2b/D$ :

$$\alpha\beta = 1 \quad \alpha/\beta^2 - \beta/\alpha^2 = S/4 \quad (3)$$

где  $S = \mu_0 M^2 D / \sigma$  — безразмерный комплекс, характеризующий собой отношение магнитного скачка давления к давлению сил поверхностного натяжения.

Решением системы уравнений (3) является выражение

$$2a/D = \sqrt[3]{S/8 + \sqrt{S^2/64 + 1}} \quad (4)$$

В сильных полях параметр  $S$  велик и относительное удлинение капли можно описать более простой зависимостью

$$2a/D = \sqrt[3]{S/4} \quad (5)$$

Теоретическая зависимость удлинения  $2a/D$  плоской капли магнитной жидкости вдоль поля от параметра  $S$ , определяемая выражением (4), приведена на рис. 2. Здесь же для сравнения дана аналогичная зависимость для свободной капли [3]. Видно, что зависимость длины плоской капли от поля более слабая ( $2a/D \sim S^{0.33}$ ), чем для свободной ( $2a/D \sim S^{0.5}$ ).

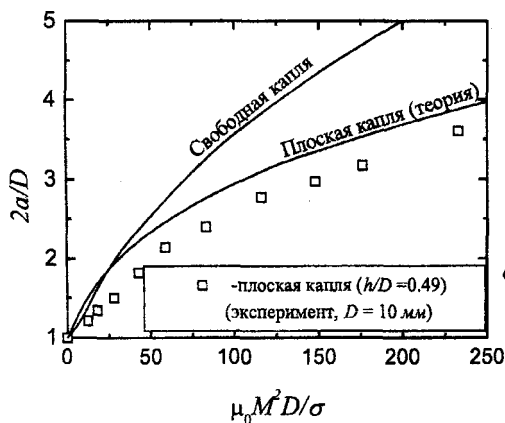


Рис. 2. Зависимость относительного удлинения капли от безразмерного параметра  $\mu_0 M^2 D / \sigma$ .

Представленное выше теоретическое рассмотрение задачи о плоской капле выполнено без учета адгезионного взаимодействия магнитной жидкости с ограничивающими твердыми поверхностями. В действительности площадь контакта жидкости с твердыми поверхностями может быть значительной. В результате адгезионное взаимодействие может оказывать существенное влияние на изменение формы капли. Поэтому полученные выше теоретические результаты справедливы, если работа когезии  $A_c$  больше работы адгезии  $A_a$ :  $A_c/A_a < 1$ . Соотношение между работой адгезии и работой когезии на единицу поверх-

го диаметра ( $D \gg (s/rg)^{1/2}$ ) обнаружена неустойчивость участков боковой поверхности, где имеется нормальная составляющая намагниченности  $M_n$  (рис. 3). Процесс изменения формы имеет некоторые характерные времена, связанные с величиной поля. Быстрому изменению формы капли противодействуют вязкости магнитной жидкости и немагнитной окружающей среды, находящихся в узкой щели. В результате при быстром включении поля капля имеет участки свободной поверхности значительной протяженности, которые находятся в поле, перпендикулярном к этой поверхности. В таком поле неустойчивость проявляется в появлении пиков, которые через некоторое время сливаются в один и капля принимает конечную форму эллиптического цилиндра.

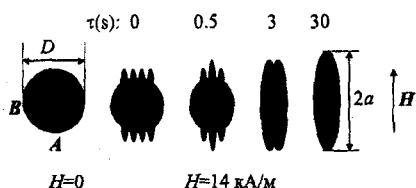


Рис. 3. Форма капли при скачкообразном включении магнитного поля

Скорость слияния пиков для каждого значения напряженности поля максимальна в начальный момент включения поля. Затем с течением времени она постепенно уменьшается. Скорость слияния пиков зависит также от величины поля и сильно увеличивается с ростом напряженности поля.

Количество пиков  $n$ , возникающих на любых участках свободной поверхности, зависит от величины поля (рис. 4). В слабых полях они не появляются, с увеличением поля число  $n$  возрастает. Представленная на рисунке зависимость носит дискретный характер: каждое значение числа пиков соответствует своему некоторому диапазону напряженности поля.

Обработка экспериментальных данных по форме капель связана со сложностью определения намагниченности магнитной жидкости внутри капли. Сравнение экспериментальных зависимостей с теоретической представлено на рис. 2. Поскольку капля является плоской,

и магнитное поле направлено вдоль нее, то при обработке экспериментальных данных намагниченность магнитной жидкости определена без учета размагничивающего фактора. Видно, что для капель соотношением  $h/D=0,49$ , удовлетворяющим условию (5), наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и теоретических данных (4). Небольшое различие, возможно, связано с эффектом размагничивающего фактора и с непостоянством кривизны боковой поверхности капли вдоль ее периметра.

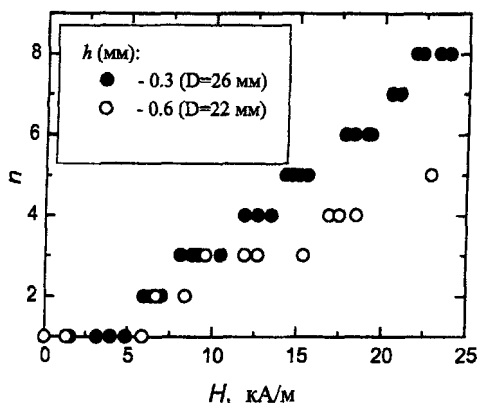


Рис. 4. Зависимость числа пиков от напряженности поля

Исследование формы плоской капли показало, что плоская капля деформируется (удлинняется) слабее, чем свободная (рис. 2). Этот факт хорошо согласуется с теоретическим рассмотрением.

Исследования формы капель и пузырей показали, что конечные удлинения  $2a/D$ , полученные при быстром включении поля и при медленном его нарастании, оказались одинаковыми (рис. 5). Интересным оказался тот факт, что капли имеют ту же конечную форму, независимо от направления изменения поля — форма одинакова как при увеличении, так и при уменьшении поля.

Увеличение относительной длины капли  $2a/D$  в магнитном поле очень слабо зависит от ее начального диаметра  $D$  и сильно от высоты щели  $h$  (рис. 6).

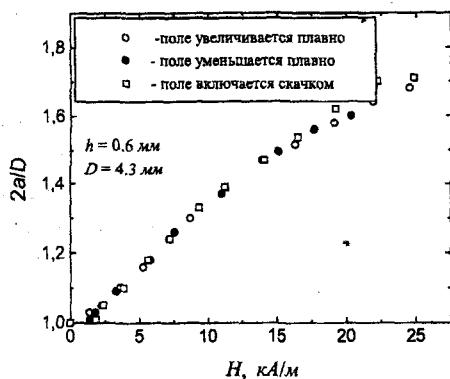


Рис. 5. Влияние характера изменения напряженности магнитного поля на относительное удлинение капель

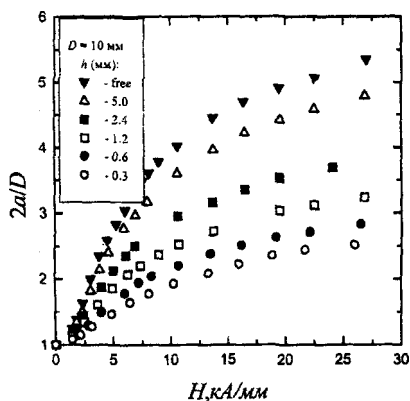


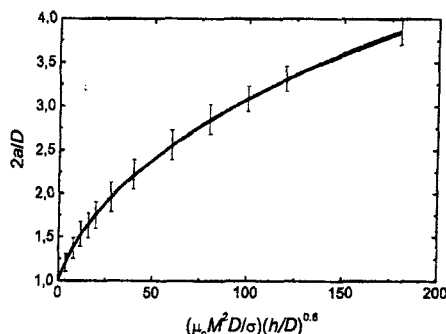
Рис. 6. Изменение формы плоской капли в зазорах различной высоты  $h$

В щелях малой высоты влияние ограничивающих твердых поверхностей оказывается существенным. В узких щелях капля значительно слабее изменяет свою длину, чем в широких. Так, если в щели с  $h = 5 \text{ мм}$  относительная длина капли увеличивается в 5 раз то в щели  $h = 0,3 \text{ мм}$  длина  $2a/D$  достигает только значения 2,5.

Из всех экспериментальных данных только приведенные на рис. 2 получены при выполнении условия (5). Поэтому форма всех остальных магнитных и немагнитных капель и пузырей в диапазоне параметров  $h = 0,3 - 5,0$  и  $D = 5,5 - 33,4 \text{ мм}$  (экспериментальные зависимости приведены в [4]) описывается обобщенной эмпирической критериальной зависимостью

$$2a/D = \left[ 1 + 0.15 \cdot S(h/D)^{0.6} \right]^{0.4} \quad (7)$$

Вид этой зависимости, а также все экспериментальные данные представлены на рис. 7. Разброс данных не превышает 8%.



*Рис. 7. Обобщенная зависимость удлинения плоской капли магнитной жидкости от безразмерного параметра*

#### 4. Заключение

Выполненные исследования позволили установить теоретические и экспериментальные закономерности изменения формы и динамики магнитных и немагнитных капель и пузырей в магнитной жидкости, помещенных в горизонтальной плоской щели. В однородном магнитном поле, направленном вдоль щели, капли и пузыри удлиняются вдоль поля. Величина удлинения не зависит от характера изменения напряженности магнитного поля и может быть описана единой для пузырей и капель обобщенной критериальной зависимостью. При скачкообразном включении поля установление равновесной формы происходит через стадию неустойчивости отдельных участков поверхности капли.

*Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.*

#### Литература

1. Magnetic fluids and Applications Handbook /Editor-in-chief: B. Berkovski, Editor: V. Bashtovoi.— Begell House Inc. Publishers, New York, USA, 1996.— 851 p.

2. R.E. Rosensweig, Ferrohydrodynamics. Cambridge University Press (1985).

3. Баштовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей.— М.: ИВТАН СССР, 1985.— 188 с.

4. B.Berkovski, V.Bashtovoi, E.Mikhalevich, S.Pogiritskaya, A.Reks A Shape of a Drop (Bubble) of a Magnetic Fluid between Parallel Planes //Abstracts of the 7-th Int. Conf. on Magnetic Fluids.— Bhavnagar, India, 1995.— P. 126–127.

5. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание.— М.: Химия., 1974.— 416 с.